

DOI 10.25741/2413-287X-2021-11-2-152

УДК 614.84.664

# ОБНАРУЖЕНИЕ И ПОДАВЛЕНИЕ ОЧАГОВ САМОНАГРЕВАНИЯ И САМОВОЗГОРАНИЯ ПРИ ХРАНЕНИИ СЫРЬЯ И ПРОДУКЦИИ

Л. ВОГМАН, д-р техн. наук, главный научный сотрудник, ФГБУ ВНИИПО МЧС России

E-mail: vogmanleo@ya.ru

*Рассмотрены способы и средства обнаружения процессов самонагрева и самовозгорания продуктов растительного происхождения при их хранении, а также предотвращения и подавления горения в хранилищах. Предложен комбинированный способ по предотвращению и тушению пожара. Приведены описания ряда характерных аварий на зерноперерабатывающих предприятиях, произошедших в 1970–90 гг., которые сопровождались пожарами и взрывами с серьезными последствиями, с характеристикой приемов и способов их предотвращения (или локализации) и ликвидации пожаров и взрывов.*

Ключевые слова: растительное сырье, комбикорма, газовый анализ, флегматизация, тушение.

В соответствии с федеральными нормами и правилами в области промышленной безопасности в целях обеспечения взрывобезопасности объектов хранения и переработки растительного сырья и продуктов его переработки, в том числе зерна и комбикормов, необходимо применять средства автоматизированного дистанционного контроля температуры (АДКТ), а также средств газового анализа, которые позволяют следить за состоянием как растительного сырья, так и подсводного и надсводного пространств в силосе [1].

Данные методы достаточно освоены. Каждый из них в отдельности, наряду с неоспоримыми преимуществами, обладает рядом недостатков. Так, при использовании стандартного метода, основанного на измерении градиента температур (средства АДКТ), возможно контролировать температуру массы сырья только в зоне непосредственного размещения конкретных термометрических электропреобразователей (термодатчиков), установленных на термоподвеске на определенной высоте. Включение же в зону контроля всего объема зернохранилища, как минимум, затруднительно, так как требует установки сотен датчиков, размещенных на десятках термоподвесок, располагающихся относительно близко друг к другу.

Метод газового анализа при термической и термоокислительной деструкции растительного сырья основан на регистрации горючих ( $H_2$ ,  $CO$ ,  $CH_4$ ) и негорючих ( $CO_2$ ,  $O_2$ ,  $N_2$ ) газов, состав и количество которых изменяются

*Methods and means of direction finding of processes of self-heating and spontaneous combustion of plant products in the equipment of their storage, as well as methods and means of preventing and suppressing gorenje in storage facilities are considered. A combined method for preventing and extinguishing fires in food storage facilities is proposed. The article describes a number of typical accidents at the enterprises of the bread and feed industry that occurred in the 1970–90 years of the last century, which were accompanied by fires and explosions with very serious consequences, with the characteristics of methods and methods of their prevention (or localization) and elimination of fires and explosions.*

Keywords: vegetable raw materials, compound feed, gas analysis, phlegmatization, quenching.

в зависимости от состояния очага в массе продукта и указывают на определенную стадию опасности очага (самонагревание, самовозгорание, устойчивое горение). Измерять концентрацию газов можно как в ручном режиме с помощью переносных газоанализаторов, регистрирующих количество газов в точке отбора проб, так и с применением автоматических систем. Метод газового анализа хотя и является достаточно оперативным методом (по сути, экспресс-методом) обнаружения признаков самонагревания и самовозгорания в хранилище растительного сырья, но не позволяет определить место очага возгорания в силосе и параметры его температурного поля.

Достоверное обнаружение очага пожара и оценка уровня аварийной ситуации достигается при совместном мониторинге и регистрации очагов самонагревания (самовозгорания) в силосах и бункерах по изменению температуры и состава газов. Наиболее оптимальный алгоритм обнаружения очага самонагревания или самовозгорания, применяемый на большинстве объектов хранения и переработки растительного сырья:

непрерывное измерение концентрации газов в хранилище, передача получаемых данных в АСУ ТП с определенной периодичностью;

непрерывный контроль температуры сырья в хранилище посредством последовательного опроса каждого датчика всех установленных в силосах термоподвесок, передача

данных о температуре в АСУ ТП с определенной периодичностью;

при обнаружении устойчивого увеличения температуры в массе продукта в любой из зон контроля, а также постоянного роста концентрации  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$  и  $\text{CH}_4$  передача в АСУ ТП предупредительной информации (например, на пульт оператора или диспетчера);

определение места нахождения термодатчика, который регистрирует максимальную скорость роста температуры;

в зависимости от значений данных об изменении температуры и состава газовой среды выдача команды на выполнение операции перемещения растительного сырья из силоса в силос или разгрузки силоса с предварительным проведением работ по флегматизации в аварийном и смежном с ним силосах.

При этом важно подчеркнуть, что реализация указанного алгоритма обнаружения очага самонагревания может быть успешно реализована с применением внедренных на объектах средств дистанционного автоматизированного управления (ДАУ) производственными процессами и работой оборудования. В соответствии с отраслевыми правилами [1] они должны обеспечивать контроль работоспособности средств ДАУ, блокировку и контроль противоаварийной защиты, производственной и аварийной сигнализации, оповещение об аварийных ситуациях; контроль за параметрами технологического процесса и управление режимами для поддержания их регламентированных значений; регистрацию срабатывания и определение устройства, выдавшего сигнал на автоматическое аварийное отключение технологической линии или оборудования; проведение операций безаварийного пуска, остановки и всех необходимых для этого переключений. В то же время возможность применения на взрывопожароопасных производственных объектах хранения и переработки растительного сырья тех или иных алгоритмов обнаружения и оборудования для их реализации, в том числе средств контроля различных параметров и сред, должно обосновываться и определяться в проектной и проектно-конструкторской документации (с учетом факторов опасностей и анализа рисков при эксплуатации объектов), с подтверждением принятых решений в установленных случаях результатами соответствующих процедур сертификации или экспертиз.

### **ФЛЕГМАТИЗАЦИЯ ПЫЛЕГАЗОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ И БЕЗОПАСНАЯ ВЫГРУЗКА ПРОДУКТА ПРИ АВАРИИ**

Исследования процессов флегматизации горючей газозоообразной среды инертными разбавителями ( $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ) в газообразном и жидком состоянии осуществлялись при подаче их как в свободный объем хранилища, так и в насыпь продукта. При любом способе подачи инертных разбавителей в виде жидкости и газа в надсводную часть силоса (свободный объем) или непосредственно в насыпь

растительного сырья сравнительно быстро снижалась концентрация горючих газов. Однако через некоторое время взрывоопасная среда восстанавливалась в силу того, что очаг потушить не удавалось даже при концентрации кислорода в области очага менее 0,5% об. д. Это подтверждает важность обнаружения очага самовозгорания на раннем этапе (до появления устойчивого горения).

Наиболее приемлемым и эффективным способом подавления очагов горения растительного сырья и продуктов его переработки, безопасной выгрузки из хранилищ является комбинированный способ. Он включает выполнение ряда операций: герметизацию опасного по взрыву силоса; флегматизацию инертными газами свободного пространства этого силоса и смежного с ним силосов, благодаря которой концентрация кислорода в воздухе в свободном объеме хранилищ должна быть снижена до безопасного уровня; выгрузку сырья при постоянном контроле газовой среды в надсводном и подсводном пространствах хранилища.

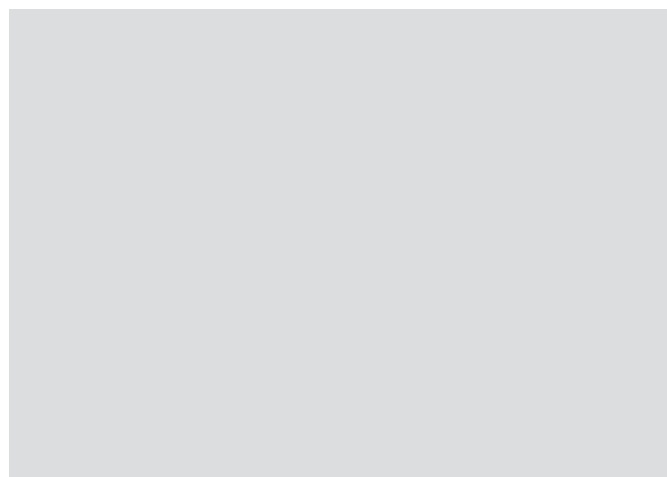
Как вариант, вместо флегматизации инертными газами может быть использован эффект вытеснения горючих газов в надсводном пространстве хранилища воздушно-механической пеной высокой или средней кратности.

Эффективность комбинированного способа обеспечивается выполнением следующих требований:

концентрация кислорода в горючей смеси не должна превышать минимальное взрывоопасное содержание кислорода, равное 8% об. д.;

подача инертных газов в свободный объем силоса должна создавать взрывобезопасную среду как в стационарных условиях, так и в случае резкого изменения содержания кислорода в смеси, например, при разгерметизации силоса или при увеличении потока воздуха из нижней части силоса в верхнюю. При этом не следует прерывать процесс флегматизации аварийного и смежных с ним силосов до полного их освобождения от продукта;

механизированная выгрузка или выгрузка вручную горящего продукта из силосов при постоянном контроле газовой среды в хранилище.



При необходимости выгружаемый из силоса горящий продукт дотушивают на полу помещения распыленной водой из ручных стволов. Одновременно предотвращается образование пыли в аварийной зоне. Вместо распыленной воды может быть использован пар.

Следует помнить, что тушение очагов горения непосредственно в силосах компактной струей воды может спровоцировать взрыв в процессе ее взаимодействия с продуктами термического распада растительного сырья.

Технический комплекс для безаварийной разгрузки хранилищ с горящим растительным сырьем состоит из трех основных систем.

Первая — система газового анализа. В качестве приборов по определению состава и количества выделяемых горючих газов могут быть применены переносные и автоматические газоанализаторы, регистрирующие водород, кислород, метан, диоксид и оксид углерода.

Вторая — система флегматизации горючих газоздушных смесей. Операция флегматизации в случае обнаружения очага горения может осуществляться при непосредственной подаче инертного газа (жидкости) от транспортной установки (например, от модуля изо-термического для жидкого диоксида углерода) или от газификационной установки жидкого азота (АГУ) различной вместимости в надсводный и подсводный объемы, а также в смежные силосы. Инертный газ может подаваться в хранилище с помощью перфорированной трубы (сухотруба), смонтированной на внутренней части стены по всей высоте силоса. В случае необходимости при ликвидации аварии на предприятиях по хранению и переработке зерна для заполнения пеной средней кратности надсводного пространства хранилища может быть использован автомобиль пенного тушения.

Третья — система выгрузки растительного сырья из хранилищ. Разработанный в процессе исследований станок пожарный буровой (СПБ) на базе бурового станка БЖ-45-100Э, применяемого в угольной промышленности, служит не только для бурения и выгрузки растительного сырья из хранилищ, создавая в нем канал до 450 мм. Он также служит для отбора проб газа, измерения температуры в заданной точке хранилища и подачи инертного разбавителя или огнетушащего средства в жидком или газообразном виде в заданную часть хранилища.

Испытания СПБ на полигонной установке объемом 35 м<sup>3</sup> и при ликвидации аварии на Томьловском элеваторе показали его эффективность. Например, время выгрузки продукта объемом 20 м<sup>3</sup> из полигонной установки составило четыре часа. В сравнении с выгрузкой вручную при использовании шнеков и штанг, которая многократно проводилась на этой установке, производительность механизированной выгрузки продукта увеличилась в 25 раз.

На основе анализа экспериментальных данных, результатов многочисленных представительных полигонных испытаний и накопленного опыта при ликвидации аварий,

пожаров и взрывов в отрасли хлебопродуктов разработаны Рекомендации [2], которые успешно использованы при локализации и ликвидации аварий на элеваторах, хлебоприемных предприятиях и комбикормовых заводах в аварийных условиях.

### ПРИМЕРЫ АВАРИЙ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ

Ниже приведено описание ряда характерных для отрасли аварий, произошедших в 1970—90 гг. на зерноперерабатывающих предприятиях, в том числе комбикормовых, которые сопровождались пожарами и взрывами с серьезными последствиями, а также приемов и способов предотвращения (или локализации) аварий и ликвидаций пожаров и взрывов [3].

#### Ивановский комбинат хлебопродуктов

(г. Иваново)

Следует отметить, что авария на комбикормовом производстве Ивановского КХП произошла еще до того, как были разработаны Рекомендации [2], проведены исследования условий самовозгорания и разработан комбинированный способ тушения.

Авария возникла вследствие самовозгорания растительного сырья, загруженного с нарушением технологического регламента по его хранению. Горение в первом силосе, загруженном хлопковым шротом, было обнаружено по выходу пара и дыма через неплотности в соединениях и по нагреву конструкций разгрузочного конуса. При проведении работ по подавлению очагов горения в силосе последний был разгерметизирован. Отсоединив от разгрузочного конуса самотечную выпускную трубу, в него подали воду пожарным стволом. Для выгрузки горячего шрота вместе с тлеющими и горящими комьями пользовались баграми. Когда столб продукта в силосе уменьшился до 4—6 м, произошел взрыв. За несколько секунд до взрыва очевидцы слышали свистящий шум втягиваемого из подсилосного этажа воздуха в свободное пространство силоса. Воздушная тяга появилась в результате обрушения массы продукта и разрыва сплошности выгружаемого шрота, а также из-за разности давления газоздушной среды в подсилосном этаже и на высоте залегания продукта. В результате газопылевоздушная смесь интенсивно перемешалась и воспламенилась.

Также очаг горения возник и в другом силосе, в нем хранился ячмень. Для ликвидации очага использовали перегретый пар, расход которого составлял 400 м<sup>3</sup>/ч. К выгрузке зерна приступили после того, как на стенках силоса в верхней его части сконденсировались капли воды. Когда силос был освобожден до того же уровня, что и в предыдущем случае, произошел взрыв.

Результат неудачных попыток ликвидации аварий в силосах с помощью воды и пара свидетельствует о том, что эти традиционные средства тушения непригодны в условиях наличия очага горения больших размеров.



В третий силос, в котором горели 35 т зернопродукта, направляли диоксид углерода ( $\text{CO}_2$ ) поочередно в жидком и газообразном виде (во избежание образования пробок в системе подачи) от установки аэрозольного тушения ТРЖУ-6 через просверленное отверстие в конусной части днища силоса по резиноканевому рукаву с бронированной оплеткой. За три часа было подано 120 кг жидкого диоксида углерода (расчетная концентрация газообразного диоксида углерода в объеме силоса составила  $1,5 \text{ кг/м}^3$ ). Во время подачи диоксида углерода и при разгрузке силоса измеряли в нем температуру и концентрацию диоксида углерода.

При аварии максимальная температура составляла  $560^\circ\text{C}$  на расстоянии 1,2–1,4 м от нижней кромки разгрузочного конуса. Через три часа с начала подачи диоксида углерода она снизилась до  $58^\circ\text{C}$  (на металлических конструкциях). Наибольшее содержание горючих газов было зарегистрировано в нижней части разгрузочного конуса и составило 1,6% об. д. оксида углерода.

Однако все очаги горения подавить таким образом не удалось. Это стало очевидным при разгрузке силоса шанцевым инструментом во время постоянной подачи газообразного диоксида углерода (расход  $0,5 \text{ кг/с}$ ). Сначала выходил продукт (примерно 15 т) температурой до  $10^\circ\text{C}$ , среди комьев которого присутствовали частицы сухого льда, а затем комья, нагретые до  $70\text{--}80^\circ\text{C}$ , с искрами.

Выгрузку зернопродукта затем продолжили при флегматизации нижнего пространства силоса жидким диоксидом углерода с одновременной подачей в надсводное пространство воздушно-механической пены (ВМП) средней кратности двумя стволами ГПС-600 для предотвращения попадания воздуха в свободный объем при обрушении слоя продукта или образовании воронки при его выгрузке. Было израсходовано 1000 л пенообразователя. Спустя 20 мин в нижней части силоса, где находилась масса горящего продукта, наблюдалось обрушение слоя, сопровождаемое шумом, напоминающим бурление жидкости. Через неплотности в болтовых соединениях просачивались кипящая вода и пар. При выгрузке зернопродукт температурой до  $50^\circ\text{C}$  выходил свободно комьями размером до 5 см. Выгрузка осуществлялась под слоем пены, который вплоть до полного опорожнения силоса составлял 3 м.

Аналогичным способом, то есть сверху пена средней кратности, а снизу жидкий диоксид углерода, был ликвидирован очаг самовозгорания в силосе-«звездочке» (полость между круглыми железобетонными силосами) объемом  $120 \text{ м}^3$  и с продуктом массой 78 т; расстояние от перекрытия «звездочки» до верхнего торца столба продукта составляло 12 м. Для заполнения надсводного пространства на слой продукта подавали пену по мере ее разрушения. Время ликвидации аварии заняло около трех суток.

Очаги горения растительного сырья на Ивановском КХП были обнаружены еще в трех силосах. Они были ликвидированы при заполнении надсводного пространства пеной средней кратности.

### **Коготковский комбикормовый завод**

*(Рязанская область)*

Авария началась со взрыва в одном из силосов ( $3 \times 3 \text{ м}$  и высотой 30 м) вследствие самовозгорания зерновой смеси (пшеница, овес, ячмень). После этого были обследованы все силосные корпуса, и по результатам термометрии и газового анализа были обнаружены очаги еще в 33 силосах.

Ликвидация аварии на комбикормовом заводе проводилась в соответствии с Рекомендациями [2] путем заполнения аварийных и смежных с ними силосов диоксидом углерода, ВМП средней кратности и водяным паром при одновременном контроле среды по температуре и газовому составу. В результате были предотвращены новые взрывы и разгружены все аварийные силосы, в которых хранилось 2,5 тыс. т зерна.

### **Томыловский элеватор**

*(Самарская область)*

На рубеже 1990-х годов на элеваторах Самарской области сложилась пожаровзрывоопасная обстановка. Это произошло из-за закладки на хранение в склады силосного типа 11 элеваторов с нарушением норм, правил и стандартов 32 тыс. т некондиционных и непросушенных семян подсолнечника. Началось самонагревание и самовозгорание массы семян, обусловленные окислением триглицеридов жирных кислот — химических соединений с высокой реакционной способностью, а также полимеризацией непредельных углеводородов. Биологические процессы в массе продукта уже при нормальной температуре в анаэробных условиях сопровождаются образованием горючих газов ( $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ ) и паров альдегидов, кетонов, спиртов, эфиров и др., а при температуре выше  $250^\circ\text{C}$  эти процессы существенно интенсифицируются и содержание горючих газов становится выше нижнего концентрационного предела распространения пламени (НКПР).

На Томыловском элеваторе не был предусмотрен газовый анализ. Температурный контроль в силосах практически отсутствовал — установки дистанционного контроля фиксировали температуру в пределах от  $-5^\circ\text{C}$  до  $+50^\circ\text{C}$  и только в точках по центральной оси силоса, расположенных на расстоянии 5 м друг от друга. Поэтому значительная зона массива продукта оставалась вне температурного контроля.

На элеваторе, состоящем из четырех силосных корпусов, включающих 240 силосов размером  $3 \times 3 \times 30 \text{ м}$ , 103 силоса были загружены некондиционными семенами подсолнечника. Начались пожары и взрывы. В одной из первых аварий погибли два работника элеватора. Всего в течение двух месяцев произошло 60 взрывов.

Принятые меры по подавлению очагов горения водой и выгрузке продукта не увенчались успехом: семена подсолнечника слежались, скомковались и скоковались. В дальнейшем для ликвидации аварийной обстановки на элеваторе применялся комбинированный способ тушения

очагов. На элеватор для выгрузки продукта из силосов был доставлен станок пожарный буровой (СПБ).

Для более полной изоляции очага горения от свободного объема надсводного пространства кроме пены предусматривалась подача на слой продукта твердого диоксида углерода (сухого льда). подача пены средней кратности проводилась стволами ГПС-600 одновременно в верхний свободный объем аварийного силоса и соседние с ним, соприкасающиеся пересыпными окнами. Силосы заполнялись пеной на всю высоту свободного пространства, сухой лед загружался через верхний люк в слой пены. Флегматизатор (газообразный азот) подавался под давлением 200 кПа через коллектор в каждый из защищаемых силосов установкой АГУ-2М в их нижнюю конусную часть. Для рыхления и выгрузки продукта был использован СПБ. Через ствол в массу насыпи продукта во время бурения и рыхления подавался газообразный азот.

Комбинированным способом тушения в первом корпусе за короткое время были ликвидированы очаги, а затем разгружены все силосы с семенами подсолнечника, а также силосы с просом (около 2 тыс. т). При этом было израсходовано 1400 кг жидкого азота, 2500 кг твердого  $\text{CO}_2$ , 2100 кг пенообразователя ПО-3А, 33 000 кг воды. В процессе выполнения аварийных работ проводился постоянный газовый анализ продуктов термической и термоокислительной деструкции, который позволял корректировать действия пожарных и работников элеватора.

Главное условие предотвращения взрыва при применении комбинированного способа — обеспечение флегматизации газового пространства, при этом концентрация кислорода в любой точке свободного пространства силосов не должна превышать 8% об. д. К сожалению, этот принцип был нарушен при выполнении работ во втором корпусе элеватора. Произошел взрыв в одном из силосов, и аварийные работы были прекращены.

### Минераловодский элеватор

(Ставропольский край)

На Минераловодском элеваторе произошло самовозгорание пшеницы в силосе диаметром 18 м, высотой 30 м, объемом 7630 м<sup>3</sup>, вместимостью 5,5 тыс. т зерна. Очаг возник в вентиляционной шахте на высоте 6–15 м от фундамента в результате нарушения режима эксплуатации силоса, графика очистки вентиляционных систем и правил хранения продукта. В процессе выполнения работ по ликвидации аварии постоянно измерялась температура системой ДКТ и осуществлялся газовый анализ. В качестве флегматизирующих составов применяли газообразный и твердый диоксид углерода, пену средней кратности, перегретый пар. Было израсходовано 19 900 м<sup>3</sup> раствора пенообразователя, 3400 м<sup>3</sup> газообразного диоксида углерода, 82 000 кг сухого льда, 1690 м<sup>3</sup> перегретого пара. Следует отметить, что в процессе ликвидации аварии концентрация водорода достигала 2,6% об. д., оксида углерода — 0,35% об. д.

Работы были успешно завершены, продукт полностью выгружен. В результате было спасено 4,5 тыс. т пшеницы. В случае взрыва могли быть разрушены склад ГСМ и участок железной дороги Москва—Кисловодск.

Анализ причин пожаров и взрывов на предприятиях по хранению и переработке растительного сырья свидетельствуют о том, что почти все они являются следствием нарушения правил, инструкций, технологического регламента, использования оборудования в аварийном состоянии. Это приводит к авариям, главная причина которых — самовозгорание растительного сырья в технологическом оборудовании. При обнаружении очага горения в хранилищах силосного типа часто приступают к проливам водой или низкократной пеной, а иногда к пропариванию аварийного силоса. Эти действия часто ведут к интенсификации горения и даже к взрывам.

В последние годы аварийность на предприятиях отрасли хлебопродуктов и комбикормов существенно снизилась [4, 5]. Это обстоятельство обусловлено рядом причин. Прежде всего, отрасль переходит от хранения растительного сырья и комбикормов в железобетонных силосах к хранению в металлических силосах меньших объемов, поскольку в них с большей надежностью обеспечивается установленный нормативными документами режим хранения по влажности, температуре, регулированию газовой среды. Хранение осуществляется строго в соответствии с технологическим процессом, в том числе с учетом сроков хранения для предотвращения слеживания и процессов разложения продукта.

### Литература

1. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности взрывопожароопасных производственных объектов хранения и переработки растительного сырья»: Приказ Ростехнадзора № 331 от 03.09.2020, зарегистрирован в Минюсте 09.12.2020, регистрационный № 61354.
2. Рекомендации по обеспечению пожарной безопасности силосов и бункеров на предприятиях по хранению и переработке зерна. — М.: Министерство хлебопродуктов СССР, 1989. — 31 с.
3. *Вогман, Л. П.* Пожарная безопасность элеваторов / Л. П. Вогман, В. И. Горшков, А. Г. Дегтярев. — М.: Стройиздат, 1993. — 289 с.
4. Статистические данные о пожарах вследствие самовозгорания веществ и материалов / Л. П. Вогман [и др.] // Хлебопродукты. — 2014. — № 10. — С. 64–65.
5. *Бритиков, Д. А.* Вопросы контрольно-надзорной деятельности и совершенствования нормативного регулирования в сфере промышленной безопасности взрывопожароопасных объектов по хранению и переработке зерна. Виды и причинно-следственные связи аварий на взрывопожароопасных объектах хранения и переработки растительного сырья / Д. А. Бритиков // Хлебопродукты. — 2016. — № 8. — С. 12–15. ■